

STANISŁAW DUBIEL\*, BARBARA ULIASZ-MISIAK\*\*

## **Wpływ ciśnienia różnicowego na wydatek wody złożowej podczas badań rurowymi próbnikami złoża utworów miocenu autochtonicznego w zapadlisku przedkarpackim**

### **Wprowadzenie**

Opróbowania rurowymi próbnikami złoża (RPZ) poziomów zbiornikowych umożliwiają uzyskanie charakterystyki złożowej niezbędnej podczas ich eksploatacji. Są stosowane przy poszukiwaniu złóż ropy naftowej, gazu ziemnego oraz wód termalnych, a także w przypadku zatłaczania odpadów płynnych do szcerpanych złóż węglowodorów. Testy RPZ pozwalają na uzyskiwanie charakterystyki złożowej w procesie wiercenia otworu (w nieorurowanym odcinku otworu), a także na selektywne (wycinkowe) badania poszczególnych przewarstwień w złożach masywowych.

Jakość uzyskiwanych wyników opróbowań RPZ zależy nie tylko od warunków geologicznych, ale również od techniki i technologii opróbowania. W wyniku właściwego doboru parametrów technologicznych możliwe jest uzyskanie bardziej wiarygodnych wyników testów złożowych tego typu. Modernizacja opróbowań pod kątem doboru odpowiednich wielkości parametrów technologicznych możliwa jest na podstawie wyników analiz wcześniej wykonanych badań. Podczas opróbowania poziomów zbiornikowych istotną rolę odgrywają następujące parametry technologiczne: ciśnienie różnicowe (depresja) wytwarzane na badany poziom; iloraz represji ciśnienia płuczki w otworze wiertniczym podczas dowiercania i depresji ciśnienia podczas opróbowania; iloraz początkowego przeciwcisnienia i ciśnienia złożowego oraz czas przyptywu płynu złożowego i czas odbudowy ciśnienia dennego. Parametry te wpływają na możliwości uzyskania i wielkość wydatku

---

\* Prof. dr hab. inż., \*\* Dr hab. inż., Katedra Inżynierii Naftowej, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków; e-mail: uliasz@agh.edu.pl

wody złożowej oraz na możliwość rejestracji i jakość krzywych zmian ciśnienia dennego (Dubiel, Uliasz-Misiak 2010).

W Polskim Górnictwie Naftowym i Gazownictwie SA dostępny jest obszerny materiał doświadczalny w postaci wyników badań przemysłowych RPZ, toteż przy projektowaniu kolejnych testów złożowych RPZ, doboru parametrów technologii opróbowania poziomów perspektywicznych – istotnie wpływających na jakość uzyskiwanych danych złożowych – można dokonywać między innymi na podstawie wyników analizy statystycznej poprzednich opróbowania. Wykonanie takiej analizy umożliwi wyznaczenie równań regresji przydatnych do projektowania parametrów technologii opróbowania metodą prognozowania.

W publikacji wykorzystano wyniki testów złożowych utworów miocenu autochtonicznego południowej części zapadliska przedkarpackiego, w strefie między Tarnowem i Rzeszowem. Były one wykonywane rurowymi próbnikami złoża, albo w trakcie wiercenia otworu, kolejno od góry do dołu w wytypowanych przez geofizykę interwałach niezarusowanych (36 testów), lub też po ukończeniu wiercenia otworu w zarusowanych interwałach profilu utworów miocenu autochtonicznego (22 testów), kolejno udostępnianych przez perforację od dołu do góry. Analizowane testy złożowe wykonano w latach 1993–1998 przy użyciu rurowych próbników złoża (RPZ) produkcji amerykańskiej firmy Halliburton typu Standard i typu Ful-Flo oraz firmy Baker typu Inflatable, a także próbnikami produkcji rosyjskiej typu KII-2M -GrozUfNII (Dubiel i in. 1998).

Interpretację wyników testów złożowych w wytypowanych interwałach oraz określenie parametrów złożowych wykonano metodą Hornera, wykorzystując program komputerowy „Próbnik” (opracowany w PNiG Kraków), w przypadkach, gdy test odbudowy ciśnienia dennego trwał około 1 do 1,5 godziny. Natomiast w przypadkach, gdy test odbudowy ciśnienia dennego trwał ponad 1,5 godziny interpretację wyników przeprowadzono metodą log-log, wykorzystując program komputerowy „Saphir 202-B” francuskiej firmy Kappa (Dubiel i in. 1998; Dubiel i in. 2003).

Opierając się na wynikach tych testów, metodami analizy statystycznej wykonano badania statystyczne parametrów petrofizycznych skał miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego. Przeanalizowano zmiany współczynnika przepuszczalności efektywnej i współczynnika przewodności hydrodynamicznej w zależności od średniego współczynnika porowatości utworów miocenu autochtonicznego. Stwierdzono wzrost wartości współczynnika przewodności hydrodynamicznej (a tym samym i przepuszczalności) wraz ze wzrostem porowatości skał piaskowcowych. Może to wskazywać na istnienie dobrej międzyporowej łączności hydraulicznej w skale zbiornikowej typu klastycznego. Tak więc stwierdzone korelacje świadczą o znacznym udziale porowatości efektywnej w ogólnej porowatości utworów miocenu, potwierdzonym próbami złożowymi w interwałach wyznaczonych metodami geofizycznymi (Dubiel, Zubrzycki 2010, 2011).

W niniejszej publikacji przedstawiono badania wpływu ciśnienia różnicowego (depresji ciśnienia) wytwarzanego na utwory miocenu podczas testów złożowych, na intensywność przyływu wody złożowej do próbnika, z utworów miocenu autochtonicznego. Należy jednak zaznaczyć, że testy te wykonywano pod kątem poszukiwań akumulacji gazu ziem-

nego w wytypowanych przez geofizykę profilach otworów wiertniczych. Jednak w dużej liczbie przypadków opróbowań uzyskiwano przyływ do próbnika wody złożowej ze śladami gazu ziemnego lub znacznie nagazowanej gazem ziemnym.

## 1. Charakterystyka obszaru badań

Zapadlisko przedkarpackie jest typowym peryferycznym basenem przedgórskim wypełnionym przez osady syn- i postorogeniczne, którego powstanie było związane z miocenną ewolucją łuku orogenicznego Karpat zewnętrznych. Podłoże zapadliska jest zbudowane ze skał platformy epiwaryscyjskiej oraz permo-mezozoicznej pokrywy. Z punktu widzenia poszukiwań naftowych największe znaczenie mają wyżej leżące osady miocenu, których miąższość sięga 3500 m (Karnkowski 2001; Kuśmierk 2004).

W obrębie zapadliska przedkarpackiego wydziela się dwie strefy: zapadlisko wewnętrzne i zewnętrzne. Osady zapadliska wewnętrznego znajdują się pod płaszczowinami karpackimi (autochtoniczne) oraz przed czołem nasunięcia Karpat fliszowych (allochtoniczne – jednostka stebnicka i borysławsko-pokucka). Osady zapadliska zewnętrznego, wieku górnego badenu i sarmatu, znajdują się przed czołem orogenu, częściowo zostały one włączone w jego obręb (jednostka zgłobicka) (Krzywiec 2006).

Osady allochtoniczne nie mają większego znaczenia jako skały zbiornikowe. Najważniejszą serią produktywną są osady autochtoniczne miocenu, wypełniające zapadlisko zewnętrzne aż po Góry Świętokrzyskie o dużej miąższości, największej sięgającej 3500 m w rowie Wielkich Oczu.

Utwory miocenu w analizowanym rejonie zapadliska przedkarpackiego tworzą kompleks o dużej, ale zróżnicowanej miąższości: od 1700 m w strefie Tarnowa, do prawie 2900 m w strefie Rzeszowa (Dubiel, Zubrzycki 2011).

Skały zbiornikowe miocenu zapadliska przedkarpackiego charakteryzują się dużą zmiennością właściwości zbiornikowych, w zależności od środowiska, w jakim powstały. Najstarszymi skałami zbiornikowymi w analizowanym rejonie zapadliska są piaskowce glaukonitowe warstw baranowskich i przeobrażone anhydryty w osadach badenu. W osadach sarmatu skałami akumulującymi głównie gaz ziemny są osady turbidytowe stożków podmorskich, osady deltowe oraz płytkomorskie osady estuariów, barier piaszczystych i lagun oraz deltowe. Ze względu na dużą miąższość i dobre uszczelnienie najlepszymi skałami zbiornikowymi są osady stożków podmorskich oraz osady deltowe (największe złoża gazu ziemnego w zapadlisku przedkarpackim). Osady piaszczyste stożków podmorskich przeważają w południowej części zapadliska, ku północy przechodzą w utwory drobniej uziarnione. Osady deltowe zalegają powyżej osadów stożków podmorskich i stanowią główną serię osadową w północnej części wschodniego zapadliska (Myśliwiec 2004).

Głównym i najczęstszym typem pułapek dla gazu ziemnego w osadach miocenu zapadliska przedkarpackiego są antykliny kompakcyjne, rzadziej występują pułapki strukturalne związane z nasunięciem Karpat. Pułapki strukturalne związane z uskokami i pułapki stra-

tygraficzne występują bardzo rzadko. Przestrenny rozkład skał o dobrych właściwościach zbiornikowych jest w utworach miocenu dość równomierny, jednak są strefy, w których ilość tych skał jest mniejsza, np. rów Wielkich Oczu (Myśliwiec 2004a).

Dane przemysłowe wykorzystane do badań statystycznych to wyniki testów złożowych wykonanych w niezarurowanych oraz zarurowanych odcinkach odwiertów udostępniających utwory miocenu autochtonicznego wieku baden górny–sarmat dolny, z których otrzymano przyływy wody złożowej o różnym stopniu nagazowania, niekiedy zanieczyszczonej filtrem płuczki wiertniczej. Do analizy statystycznej skompletowano łącznie 57 interwałów wytypowanych metodami geofizyki wiertniczej, jako strefy potencjalnie gazonośne (tab. 1).

TABELA 1

Zestawienie wyników opróbowań RZP wykonanych w utworach miocenu autochtonicznego analizowanego rejonu zapadliska przedkarpackiego

TABLE 1

Results of DST tests performed in the autochthonous Miocene deposits of the analyzed region Carpathian Foredeep

Lp.	Otwór	Nr zapięcia RPZ/rok	Głębokość interwału opróbowania [m]	Sposób udostępnienia interwału opróbowania
1.	Brze-2	6/1993	1260–1304	nieorurowany
2.	Brze-4	162/1993	921–969	nieorurowany
3.	Brze-4	165/1993	820–860	nieorurowany
4.	Brze-6	8/1994	920–952	nieorurowany
5.	Brze-9	45/1995	1148–1166	nieorurowany
6.	Brze-9	48/1995	933–972	nieorurowany
7.	Dwo-1	200/1994	943–1047	nieorurowany
8.	Kom-1	106/1994	732–784	nieorurowany
9.	Łaz-8	137/1993	757–789	nieorurowany
10.	Łaz-8	138/1993	659–679	nieorurowany
11.	Pil-45k	13/1993	2366–2395	nieorurowany
12.	Pil-45k	56/1995	1445–1486	perforowany
13.	Pil-45k	58/1995	1367–1378	perforowany
14.	Pil-45k	54/1995	1537–1586	perforowany
15.	Pil-42	99/1996	810–815	perforowany
16.	Pil-47	108/1996	790–800	perforowany
17.	Pil-47	109/1996	670–690	perforowany
18.	Pil-47	99/1996	810–815	perforowany
19.	PogWol-17	16/1997	1915–1930	perforowany
20.	PogWol-17	35/1997	698–705	perforowany
21.	PogWol-17	9/1997	2011–2030	perforowany
22.	PogWol-17	17/1997	1781–1805	perforowany

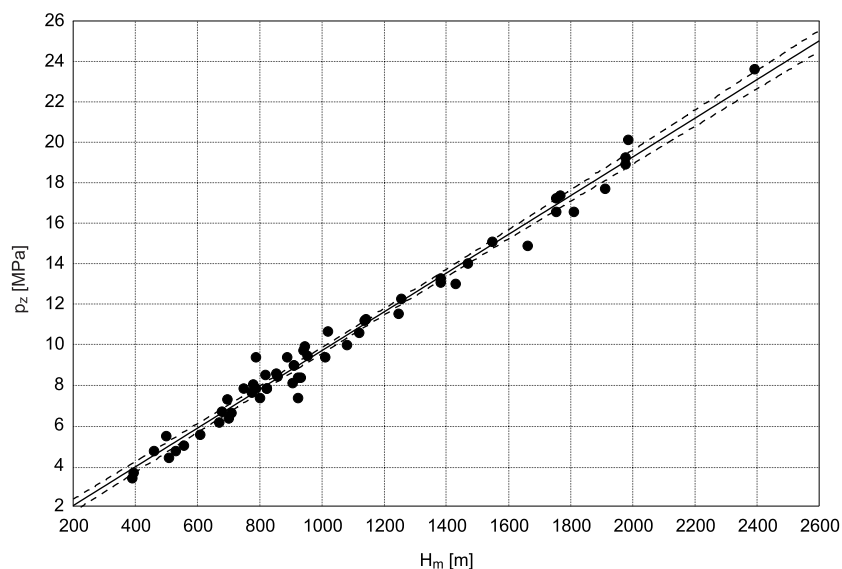
Tabela 1 cd.

Table 1 cont.

Lp.	Otwór	Nr zapięcia RPZ/rok	Głębokość interwału opróbowania [m]	Sposób udostępnienia interwału opróbowania
23.	Poj-7	125/1994	605–641	nieorurowany
24.	Poj-7	132/1994	380–411	nieorurowany
25.	Poj-7	129/1994	440–456	nieorurowany
26.	Poj-7	127/1994	557–607	nieorurowany
27.	Rad-3	88/1995	804–855	nieorurowany
28.	Rad-3	89/1995	813–831	nieorurowany
29.	Rze-7	1/1993	1742–1785	nieorurowany
30.	Scha-1	55/1993	772–806	perforowany
31.	Scha-1	54/1993	831–875	perforowany
32.	Scha-2	176/93	812–884	nieorurowany
33.	Skrz-1k	84/1994	1770–1779	perforowany
34.	Skrz-1k	77/1994	1801–1808	perforowany
35.	Skrz-1k	96/1994	932–949	perforowany
36.	Skrz-1k	92/1994	1022–1030	perforowany
37.	Sta-3	9/1998	933–955	perforowany
38.	Sta-3	5/1998	1983–2014	nieorurowany
39.	Sta-3	7/1998	1771–1794	nieorurowany
40.	StWie-1	51/1995	365–378	perforowany
41.	Szcz-19	84/1996	690–741	nieorurowany
42.	Tar-70k	94/1993	878–912	nieorurowany
43.	Tar-70k	87/1993	1058–1096	perforowany
44.	Tar-70k	94/1993	878–912	nieorurowany
45.	War-4k	95/1993	528–576	nieorurowany
46.	Zac-7	155/1994	1070–1140	nieorurowany
47.	Zac-7	158/1994	1140–1145	nieorurowany
48.	Zac-8	51/1996	1110–1085	nieorurowany
49.	Zac-8	53/1996	513–618	nieorurowany
50.	Zas-5	9/1996	928–970	nieorurowany
51.	Zaw-4	57/1993	1372–1415	nieorurowany
52.	Zaw-4	51/1993	1678–1693	perforowany
53.	Zaw-5k	126/1993	1375–1390	perforowany
54.	Zdr-2	167/1994	532–569	nieorurowany
55.	Żuk-42	54/1997	1465–1490	nieorurowany
56.	Żuk-43	48/1997	795–823	nieorurowany
57.	Żyr-1	67/1993	754–887	nieorurowany

**2. Analiza zmian ciśnienia złożowego i początkowego przeciwi ciśnienia  
na badany interwał  
w funkcji głębokości zalegania utworów miocenu**

Badanie korelacji między wydatkiem przyływu wody złożowej ( $Q$ ) a początkową wartością depresji ciśnienia ( $\Delta p_o$ ) – różnicą ciśnienia złożowego ( $p_z$ ) i przeciwi ciśnienia początkowego ( $p_p$ ) – w kolumnie próbnikowej wymaga dokonania prawidłowej prognozy tych ciśnień. Ponieważ ciśnienie złożowe rośnie wraz z głębokością zalegania skał zbiornikowych (rys. 1), toteż w wyniku wstępnej oceny danych empirycznych na podstawie wykresu rozrzutu punktów, dla badanej zależności dobrano model liniowy mający postać:  $y = ax + b$  oraz oszacowano współczynniki modelu  $a$  i  $b$  metodą najmniejszych kwadratów.



Rys. 1. Zależność ciśnienia złożowego od głębokości w analizowanym rejonie zapadliska przedkarpackiego

Fig. 1. Relationship between the reservoir pressure and the depth in the analyzed region of the Carpathian Foredeep

Otrzymano następujące równanie regresji liniowej:

$$p_z = 0,0096 \cdot H_m + 0,1107 \quad (1)$$

$P_z$  – ciśnienie złożowe [MPa],

$H_m$  – głębokość umieszczenia rejestrującego ciśnieniomierza w głębinie [m].

Porównując obliczoną wartość współczynnika korelacji  $r = 0,9921$  z wartością krytyczną tego współczynnika  $r_\alpha = 0,2569$ , odczytaną z tablic statystycznych (Zieliński 1972) dla

poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ , można stwierdzić, że model ten bardzo dobrze nadaje się do prognozowania wartości ciśnienia złożowego ( $p_z$  w MPa) na zadanej głębokości ( $H_m$  w m). Tak więc, wartości ciśnienia złożowego określane na podstawie wyników testów złożowych wykonywanych RPZ są obarczone małą niepewnością standardową oraz rozszerzoną (Bednarz i in. 2009).

Początkowe przeciwcisnienie ( $p_p$ ) wytwarzane na skały zbiornikowe podczas testów złożowych wykonywanych rurowymi próbnikami złoża zależy od czynników technicznych i złożowych (Dubiel i in. 1990). Ma ono wpływ na ograniczanie początkowej wartości różnicy ciśnienia (depresji ciśnienia –  $\Delta p_o$ ) wytwarzanej próbnikiem na badany poziom skał zbiornikowych według wzoru:

$$\Delta p_o = p_z - p_p \quad (2)$$

Zbyt duża wartość początkowej różnicy ciśnienia może mieć bardzo szkodliwy wpływ na warunki dopływu płynu złożowego do otworu wiertniczego i próbника (Dubiel 1988).

Sterowanie czynnikami technicznymi, w celu zwiększenia przeciwcisnienia, dokonuje się poprzez wzrost ciężaru właściwego cieczy przybitkowej (woda lub płuczka) oraz wysokości jej słupa w kolumnie próbnikowej, a także zmniejszanie średnicy zwężki wgłębnej lub powierzchniowej, albo też zmniejszanie średnicy wewnętrznej kolumny próbnikowej. Natomiast czynnikami złożowym powodującym wzrost tego przeciwcisnienia jest wzrost wydatku przyływu płynu złożowego, a zwłaszcza wody złożowej.

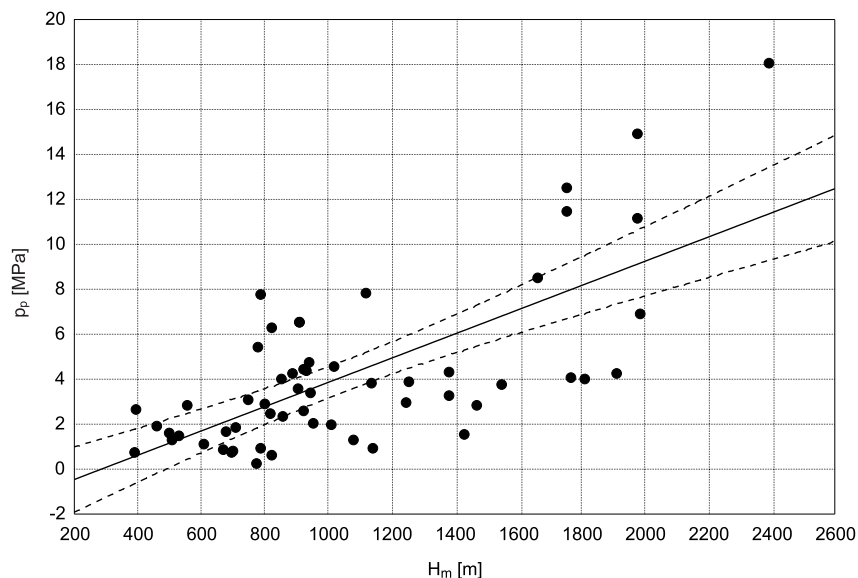
Wartość początkowego przeciwcisnienia rejestrowana jest podczas testów złożowych wykonywanych rurowym próbnikiem złoża w początkowym punkcie pierwszej krzywej przyływu. W przypadku opróbowania utworów miocenu, w celu zmniejszenia wartości początkowej ciśnienia różnicowego, najczęściej używano zwężkę wgłębą o średnicy 8, 10 lub 12 mm, albo też nie stosowano takiej zwężki, a jako przybitkę stosowano wodę o niezbyt dużej wysokości słupa, tj. od około 50 do około 500 m.

Wysokość słupa cieczy przybitkowej (wody) dobierano bez uwzględniania głębokości zapięcia próbника, a mimo to metodami analizy statystycznej stwierdzono zadawalającą korelację między początkowym przeciwcisnieniem a głębokością zapięcia próbника (rys. 2), uzyskując następujące równanie regresji liniowej:

$$p_p = 0,0054 H_m - 1,5375 \quad (3)$$

Obliczona wartość współczynnika korelacji  $r = 0,7014$ , a krytyczna  $r_\alpha = 0,2969$  na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

Uzyskana korelacja, zdaniem autorów, może wskazywać na występowanie prawidłowości niekorzystnej dla warunków przyływu gazu ziemnego. Mianowicie, mniejsza wysokość słupa wody przybitkowej odpowiada większej chwilowej wartości ciśnienia różnicowego w postaci udaru hydraulicznego na skały zbiornikowe, powodując bardziej intensywny przyływ wody złożowej w kierunku otworu wiertniczego. W wyniku tego wzrastają opory



Rys. 2. Zależność początkowego przeciwcisnienia na warstwę badaną RPZ od głębokości jej zalegania w analizowanym rejonie zapadliska przedkarpackiego

Fig. 2. Relationship between the initial back-pressure on the formation tested DST and the depth in the analyzed region of the Carpathian Foredeep

hydrauliczne na zwężce wstępnej i w kolumnie próbnikowej, a to ostatecznie powoduje wzrost początkowego przeciwcisnienia wytwarzanego na badane skały, rejestrowanego przez ciśnieniomierz wstępny w początkowym punkcie wykresu przyływu. Takie zjawisko może prowadzić do zwiększenia nasycenia skał strefy przyotworowej wodą, a tym samym wzrost przepuszczalności względnej skał strefy przyotworowej dla wody, a zmniejszenia przepuszczalności dla gazu ziemnego względnej w tej strefie.

Tak więc przeciwcisnienie wynikające z oporów hydraulicznych ( $\Delta p_1$ ) z jednej strony uzupełnia braki przeciwcisnienia statycznego wywieranego słupem cieczy przybitkowej ( $p_{hp}$ ), a z drugiej – pogarsza warunki dopływu gazu ziemnego ze złoża do otworu wiertniczego i próbnika spowodowane oddziaływaniem udaru hydraulicznego na te skały. Ponadto, wspomniany udar hydrauliczny może powodować znaczną mobilność cząstek ilastych występujących w utworach miocenu i blokować nimi kanały porowe strefy przyotworowej (Falkowicz, Dubiel 2002).

W celu minimalizacji udaru hydraulicznego wskazane jest stosowanie w kolumnie próbnikowej słupa przybitki wodnej o znacznie większej wysokości (od około 1/3 do około 1/2 długości kolumny próbnikowej), bez konieczności stosowania zwężki wstępnej (Dubiel 1988).



### 3. Analiza zmian wydatku wody złożowej w funkcji początkowej wartości ciśnienia różnicowego

Początkowa wartość ciśnienia różnicowego (depresja ciśnienia) jest jednym z podstawowych parametrów technologii opróbowania. Definiowana jest ona jako różnica między ciśnieniem złożowym ( $p_z$ ) a przeciwcisnieniem ( $p_p$ ) rejestrowanym w początkowym punkcie krzywej przyływu płynu złożowego. Przeciwcisnienie to ogranicza (zmniejsza) początkową wartość ciśnienia różnicowego wywieranego na badane skały i jest sumą ciśnienia hydrostatycznego słupa cieczy przybitkowej w kolumnie próbnikowej ( $p_{hp}$ ) oraz oporów hydraulicznych przepływu płynu w kolumnie próbnikowej ( $\Delta p_1$ ). Dobór minimalnej wartości ciśnienia różnicowego ma na celu otrzymanie przyływu płynu złożowego do próbnika o reprezentatywnej objętości w określonym czasie oczekiwania na przyływ. Gdy początkowa wartość ciśnienia różnicowego jest mniejsza od minimalnej, nie uzyskuje się reprezentatywnej próbki płynu złożowego.

Przeprowadzono analizę statystyczną danych uzyskanych testami RPZ utworów miocenu autochtonicznego zapadliska przedkarpackiego (por. tab. 1), nie uzyskując korelacji dla następujących zależności:

- wydatku przyływu do próbnika wody złożowej od początkowej wartości ciśnienia różnicowego  $Q = f(\Delta p_o)$ ;
- wydatku przyływu do próbnika wody złożowej od ilorazu przeciwcisnienia i ciśnienia złożowego  $p_p/p_z = f(Q)$ ;
- ilorazu przeciwcisnienia i ciśnienia złożowego od głębokości  $p_p/p_z = f(H_m)$ .

Przyczynami braku korelacji mogą być zmienne warunki geologiczne (znaczna niejednorodność litologiczno-facjalna utworów miocenu, dwufazowy przepływ płynu złożowego), jak też warunki technologiczne opróbowania w analizowanym obszarze (brak jednolitego sposobu wytwarzania przeciwcisnienia i doboru jego wartości).

W celu potwierdzenia wpływu tych przyczyn wybrano 22 testy złożowe RPZ uzyskane z otworów położonych na północny wschód od Tarnowa (rejon Dębicy).

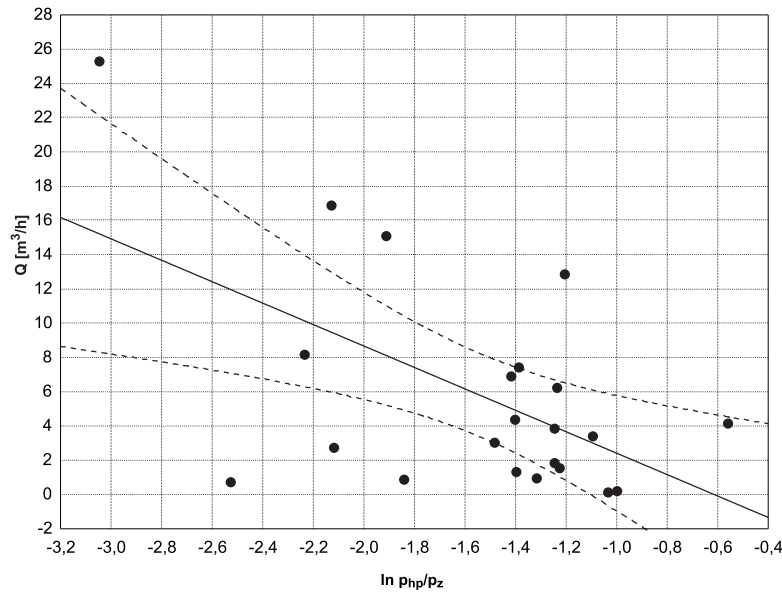
Dla tego wybranego rejonu uzyskano korelacje pomiędzy:

- 1) wydatkiem przyływu wody złożowej  $Q$  a ilorazem: ciśnienia hydrostatycznego słupa wody przybitkowej w kolumnie próbnikowej ( $p_{hp}$ ) i ciśnienia złożowego ( $p_z$ ). Otrzymano następujące równanie regresji (rys. 3):

$$Q = -3,836 - 6,255 \ln \left( \frac{p_{hp}}{p_z} \right) \quad (4)$$

Obliczona wartość współczynnika korelacji  $r = 0,5596$ , a krytyczna  $r_\alpha = 0,4143$  na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

Równanie (4) nadaje się do prognozowania wydatku wody złożowej z utworów miocenu autochtonicznego dla projektowanej wartości ilorazu ciśnień  $p_{hp}/p_z$ ;



Rys. 3. Zależność wydatku wody złożowej od ilorazu ciśnień  $p_{hp}/p_z$  w otworach wiertniczych opróbowanych RPZ w rejonie Dębicy

Fig. 3. Relationship between the formation water flow rate and the pressure ratio  $p_{hp}/p_z$  in wells tested DST in the Debica region

- 2) początkowym przeciwcisnieniem ( $p_p$ ) a głębokością pomiaru ciśnienia ( $H_m$ ), otrzymując następujące równanie regresji (rys. 4):

$$p_p = 0,0075 (H_m) - 3,1283 \quad (5)$$

Obliczona wartość współczynnika korelacji  $r = 0,8102$ , a krytyczna  $r_\alpha = 0,4143$  na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

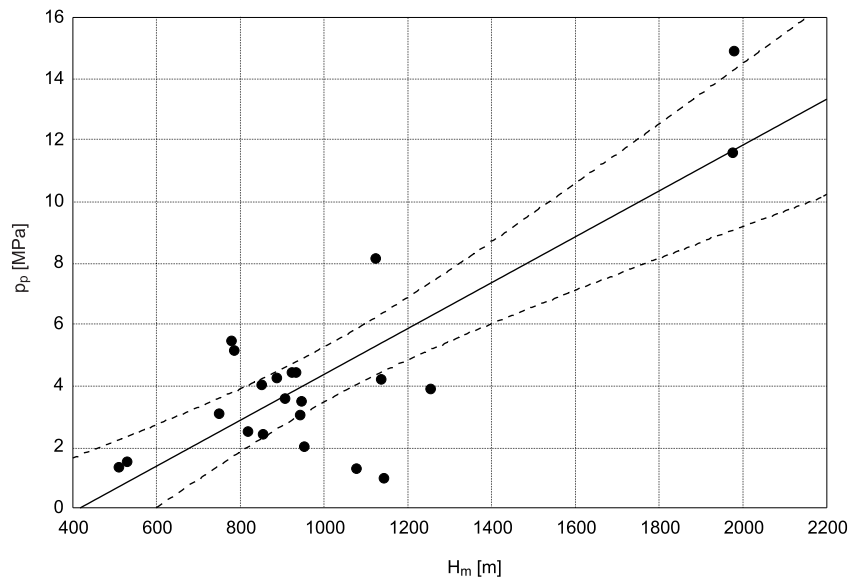
Równanie (5) można wykorzystać przy ustalaniu wielkości przeciwcisnienia przy badaniu RPZ utworów miocenu autochtonicznego dla określonej głębokości;

- 3) początkowym przeciwcisnieniem ( $p_p$ ) a wydatkiem przyływu wody złożowej  $Q$ , otrzymując następujące równanie regresji (rys. 5):

$$p_p = 0,9941 (Q) + 1,5219 \quad (6)$$

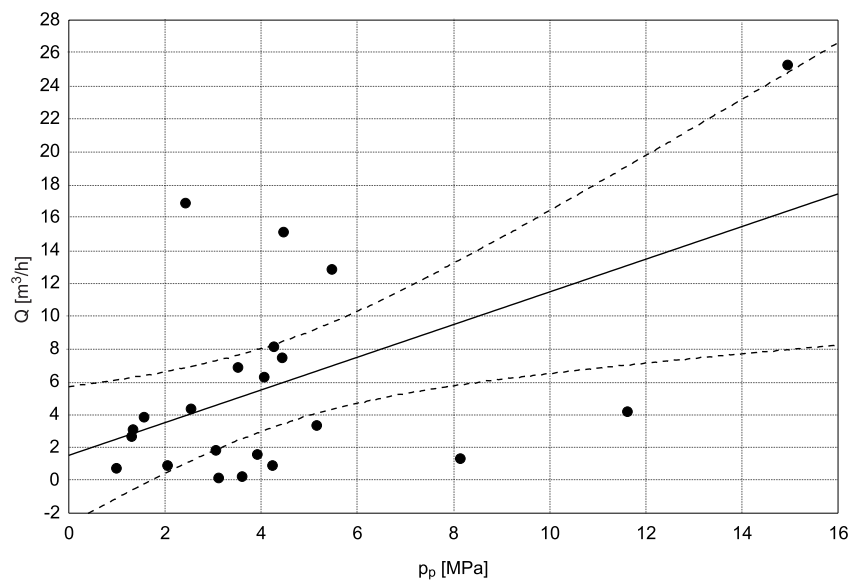
Obliczona wartość współczynnika korelacji  $r = 0,5182$ , a krytyczna  $r_\alpha = 0,4143$  na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

Natomiast, tak jak poprzednio, również dla tych 22 wybranych testów złożowych RPZ nie otrzymano korelacji zależności wydatku wody złożowej w funkcji ciśnienia różnicowego:  $Q = f(\Delta p_o)$ . Nie uzyskano również korelacji pomiędzy ciśnieniem hydrostatycznym słupa wody przybitkowej w kolumnie próbnikowej a głębokością oraz



Rys. 4. Zależność początkowego przeciwiścienia na warstwę badaną RPZ od głębokości jej zalegania w otworach wiertniczych opróbowanych RPZ w rejonie Dębicy

Fig. 4. Relationship between the initial back-pressure on the formation tested DST and the depth in the Debica region



Rys. 5. Zależność początkowego przeciwiścienia na warstwę badaną RPZ od wydatku wody złożowej w otworach wiertniczych opróbowanych RPZ w rejonie Dębicy

Fig. 5. Relationship between the initial back-pressure on the formation tested DST and the formation water flow rate in wells tested DST in the Debica region

wydatkiem wody złożowej. Nie stwierdzono także korelacji pomiędzy głębokością a łożem: ciśnienia hydrostatycznego słupa wody przybitkowej w kolumnie próbnikowej i ciśnienia złożowego.

Zmniejszenie różnicy ciśnienia spowodowane oporami hydraulicznymi ( $\Delta p_1$ ) jest sumą oporów hydraulicznych przepływu wody złożowej w kanałach przelotowych próbnika, kolumnie próbnikowej i zwężce wgłębnej. Można go wyrazić wzorem:

$$\Delta p_1 = p_p - p_{hp} = H_p \cdot \gamma_p \quad (7)$$

gdzie:

$H_p$  – wysokość słupa [m],

$\gamma_p$  – ciężar właściwy cieczy przybitkowej [ $\text{N/m}^3$ ].

Badania zależności między  $\Delta p_1$  a wydatkiem wody złożowej, były wcześniej prowadzone metodami statystycznymi na podstawie wyników testów złożowych RPZ wykonanych w latach osiemdziesiątych XX wieku (Uliasz-Misiak 1999). Analizę przeprowadzono dla 52 badań RPZ poziomów wodonośnych miocenu zapadliska przedkarpackiego. Stwierdzono, że zależność:  $\Delta p_1 = f(Q)$  charakteryzuje się znacznym współczynnikiem korelacji, a najlepiej opisuje ją model liniowy. Uzyskano następujące równanie regresji:

$$\Delta p_1 = 0,66223 + 14,3984Q \quad (8)$$

Obliczona wartość współczynnika korelacji wynosi:  $r = 0,5662$ , a krytyczna  $r_\alpha = 0,2732$  na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Równanie (8) nadaje się do prognozowania wartości sumarycznego zmniejszenia (ograniczenia) początkowej różnicy ciśnień (depresji), w wyniku występujących w kolumnie próbnikowej oporów hydraulicznych, dla wartości wydatku przyływu wody złożowej  $Q$  prognozowanego według równania (4).

### Wnioski końcowe

1. Zbyt mała wysokość słupa wody przybitkowej w kolumnie próbnikowej powoduje bardziej intensywny przyływ wody złożowej do otworu wiertniczego oraz próbnika i zwiększenie nasycenia skał strefy przyodwiertowej wodą, a tym samym, wzrost przepuszczalności względnej skał strefy przyotworowej dla wody, a zmniejszenie względnej przepuszczalności skał w tej strefie dla gazu ziemnego.
2. Analiza danych przemysłowych wykazała, że w celu ograniczenia ujemnych skutków oddziaływania na utwory miocenu zbyt dużego ciśnienia różnicowego, a zwłaszcza w celu poprawy warunków przyływu gazu ziemnego do otworu, wskazane jest wypełnianie cieczą przybitkową (wodą) więcej niż 51% długości kolumny próbnikowej.

3. Słaba korelacja lub jej brak pomiędzy początkową wartością ciśnienia różnicowego wytwarzaną na badany poziom a wydatkiem wody złożowej, może mieć przyczyny geologiczne i technologiczne dowiercania i opróbowania utworów miocenu. Potwierdziła to częściowo analiza danych przemysłowych dla rejonu Dębicy.
4. Wyznaczone metodami statystycznymi równania regresji umożliwiają prognozowanie wartości ciśnienia złożowego ( $p_z$ ), całkowitego (statycznego –  $p_{hp}$  i hydraulicznego –  $\Delta p_1$ ) przeciwcisnienia początkowego ( $p_p$ ) oraz wydatku przyływu wody złożowej do odwiertu ( $Q$ ). Mogą być one wykorzystane przy doborze parametrów technologicznych testów złożowych stref gazonośnych w kolejnych otworach wiertniczych, w analizowanym obszarze zapadliska przedkarpackiego, a w szczególności w rejonie Dębicy.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.190.555

#### LITERATURA

- Bednarz i in. 2009 – Bednarz S., Rzyczniak M., Twardowski K., 2009 – Podstawy metrologii w górnictwie nafty i gazu. Wyd. AGH, Kraków.
- Dubiel S., Zubrzycki A., 2010 – Analiza właściwości zbiornikowych utworów miocenu autochtonicznego Zapadliska Przedkarpackiego na podstawie wyników opróbowania złożowych i geofizyki wiertniczej. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz t. 27, z. 1–2*, s. 121–128.
- Dubiel S., Zubrzycki A., 2011 – Zmienność współczynnika przewodności hydrodynamicznej w utworach miocenu autochtonicznego Zapadliska Przedkarpackiego na podstawie wyników testów złożowych i pomiarów geofizyki wiertniczej. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz z. 1–2*, s. 105–113.
- Dubiel S., 1988 – Badanie wpływu wielkości depresji na wyniki pomiaru rurowym próbnikiem złoża. *Górnictwo z. 4*, s. 257–270.
- Dubiel i in. 2003 – Dubiel S., Chrzęszcz W., Rzyczniak M., 2003 – Problemy opróbowania warstw perspektywicznych rurowymi próbnikami złoża. *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003*, s. 219.
- Dubiel S., Rzyczniak M., 1997 – Analiza opróbowania warstw perspektywicznych próbnikami złoża w obszarze Przedgórze Karpat. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz t. 14*, s. 41–49.
- Dubiel i in. 1998 – Dubiel S., Rzyczniak M., Wójtowicz T., Kułaga T., i in., 1998 – Analiza i interpretacja wyników opróbowania rurowymi próbnikami złoża warstw perspektywicznych w obszarze przedgórze Karpat i w Karpatach. *Archiwum Wydziału WNiG AGH, Kraków, lata 1993–1998* (praca niepublikowana).
- Dubiel i in. 1990 – Dubiel S., Uliasz-Misiak B., Wiśniowski R., 1990 – Badanie wpływu czynników technicznych i złożowych na wielkość ograniczenia depresji w czasie pomiarów rurowym próbnikiem złoża. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geosynoptyka i Geotermia nr 6*, s. 19–23.
- Falkowicz S., Dubiel S., 2002 – Badanie wpływu płuczek wiertniczych na przepuszczalność skał zbiornikowych miocenu autochtonicznego przedgórze Karpat. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz t. 19, z. 1*, s. 349–355.
- Karnkowski P., 2001 – Geologia i ropogazoność Przedgórze Karpat. *Pr. Inst. Gór. Naft. i Gazow.*, nr 109, 80 s.
- Krzywiec P., 2006 – Geodynamiczne i tektoniczne uwarunkowania ewolucji basenów przedgórskich, z odniesieniami do zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny vol. 54, nr 5*, s. 404–412.
- Kuśmierzek J., 2004 – Systemy naftowe – pierwotny potencjał węglowodorowy a zasoby prognostyczne ropy naftowej i gazu ziemnego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 20, z. 3*, s. 27–54.

- Myśliwiec M., 2004 – Miocenne skały zbiornikowe zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny* vol. 52, nr 7, s. 581–592.
- Myśliwiec M., 2004a – Typy pułapek gazu ziemnego i strefowość występowania ich złóż w osadach miocenu wschodniej części zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny* vol. 52, nr 8/1, s. 657–664.
- Uliasz-Misiak B., 1999 – Technologia opróbowania poziomów wodonośnych rurowym próbnikiem złoża. *Studia, Rozprawy, Monografie* nr 68, s. 45.
- Zieliński R., 1972 – *Tablice statystyczne*. PWN, Warszawa.

**WPLYW CIŚNIENIA RÓŻNICOWEGO NA WYDATEK WODY ZŁOŻOWEJ PODCZAS BADAŃ  
RUROWYMI PRÓBNIKAMI ZŁOŻA UTWORÓW MIOCENU AUTOCHTONICZNEGO W ZAPADLISKU PRZEDKARPACKIM**

Słowa kluczowe

Badanie rurowym próbnikiem złoża, miocen, zapadlisko przedkarpackie, depresja, przeciwcisnienie, wydatek, woda złożowa, analiza statystyczna

Streszczenie

Przeprowadzono analizę wyników opróbowania utworów miocenu autochtonicznego wieku baden górny – sarmat dolny w zapadlisku przedkarpackim rurowymi próbnikami złoża. Testy złożowe były wykonywane w nieorurowanych oraz w orurowanych odcinkach odwiertów, z których otrzymano przyipywy wody złożowej o różnym stopniu nagazowania, a niekiedy też zanieczyszczonej filtratem płuczki wiertniczej. Łącznie przeanalizowano 57 interwałów wytypowanych metodami geofizyki wiertniczej.

Metodami analizy statystycznej wyznaczono zależność ciśnienia złożowego od głębokości zalegania utworów miocenu, a także zależność początkowego przeciwcisnienia wytwarzanego na te utwory podczas testu RPZ, od głębokości zalegania tych utworów. Natomiast nie stwierdzono korelacji między wydatkiem wody a początkowym ciśnieniem różnicowym.

Dla wybranych 22 interwałów miocenu z rejonu Dębicy uzyskano zadowalającą korelację pomiędzy: wydatkiem wody złożowej a logarytmem naturalnym ilorazu: ciśnienia hydrostatycznego słupa wody przybitkowej w kolumnie próbnikowej i ciśnienia złożowego (w rejonie tym wartość ilorazu ciśnień:  $p_{hp}/p_z$  wahała się w bardzo szerokich granicach, tj od 0,05 do 0,57). Stwierdzono również korelację między początkowym przeciwcisnieniem a głębokością pomiaru ciśnienia oraz początkowym przeciwcisnieniem a wydatkiem wody złożowej.

Wyznaczone metodami statystycznymi równania regresji umożliwiają prognozowanie wartości ciśnienia złożowego, początkowej wartości przeciwcisnienia, podczas testów RPZ, wydatku wody złożowej oraz początkowego ciśnienia różnicowego i mogą być wykorzystane przy projektowaniu parametrów technologicznych kolejnych testów złożowych, w analizowanym obszarze zapadliska przedkarpackiego, a w szczególności w rejonie Dębicy.

**INFLUENCE OF DIFFERENTIAL PRESSURE ON FORMATION WATER FLOW RATE DURING TESTS  
OF THE THE AUTOCHTONOUS MIOCENE DEPOSITS IN THE CARPATHIAN FOREDEEP WITH DST**

Key words

Drill tests, Miocene, Carpathian Foredeep, depression, repression, flow rate, formation water, statistical analysis

Abstract

The results of drill stem tests made on the autochthonous Miocene deposits of the Upper Badenian – Lower Sarmatian age in the Carpathian Foredeep were analyzed. Reservoir tests were performed in open and cased holes,

where inflows of formation water of varying saturation degree and sometimes contaminated with drilling mud filtrate, were observed. A total of 58 intervals, geophysically qualified as gas-bearing, were analyzed.

Statistical analysis methods were used for determining the influence of the formation depth on the depth of deposition of the Miocene, and also dependence of initial back-pressure exerted on the reservoir during DST, on the depth of deposition of the reservoir. No correlation was found between water flow rate and initial differential pressure.

A satisfactory correlation was obtained between hydrostatic pressure of water cushion in the tubing string and reservoir pressure for selected 22 the Miocene intervals in the Dębica region. In this region the pressure quotient  $p_{hp}/p_z$  broadly ranged between 0.05 and 0.57. Another correlation was noted between initial back-pressure and a depth at which pressure was measured and initial back-pressure, and formation water flow rate. The regression equations determined with statistical methods can be used for predicting values of formation pressure, initial value of back-pressure, formation water flow rate and initial differential pressure during DST. On this basis technological parameters of successive reservoir tests can be determined for in the analyzed area of the Carpathian Foredeep, particularly in the Dębica region.

